

【公開版】

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「プレス式水冷システムを用いた双晶組織形成制御による高音質なシン
バル用高錫濃度ブロンズ合金の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人ふくい産業支援センター

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論一（1）

- 【1】金属結晶粒微細化のための最適組織化技術開発
 - 【1-1】第3元素（Ti, Zr,P）の添加量の検討
 - 【1-2】組織観察、機械的性質の調査
- 【2】プレス式水冷システムを用いたブロンズ熱処理加工技術の高度化
 - 【2-1】有限要素解析（FEM 解析）によるコールドプレートの最適な構造設計
 - 【2-2】プレス式水冷システムの開発
 - 【2-3】プレス条件の最適化、および割れ・歪み評価
 - 【2-4】双晶組織形成のための熱処理条件を確立
- 【3】ブロンズ組成と音響との相関解析・評価
 - 【3-1】残響・余韻に関連する周波数特性解析
 - 【3-2】組織別シンバルでの放射音音場解析
 - 【3-3】プレス式水冷システムで製作したシンバルの音質評価

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究の背景

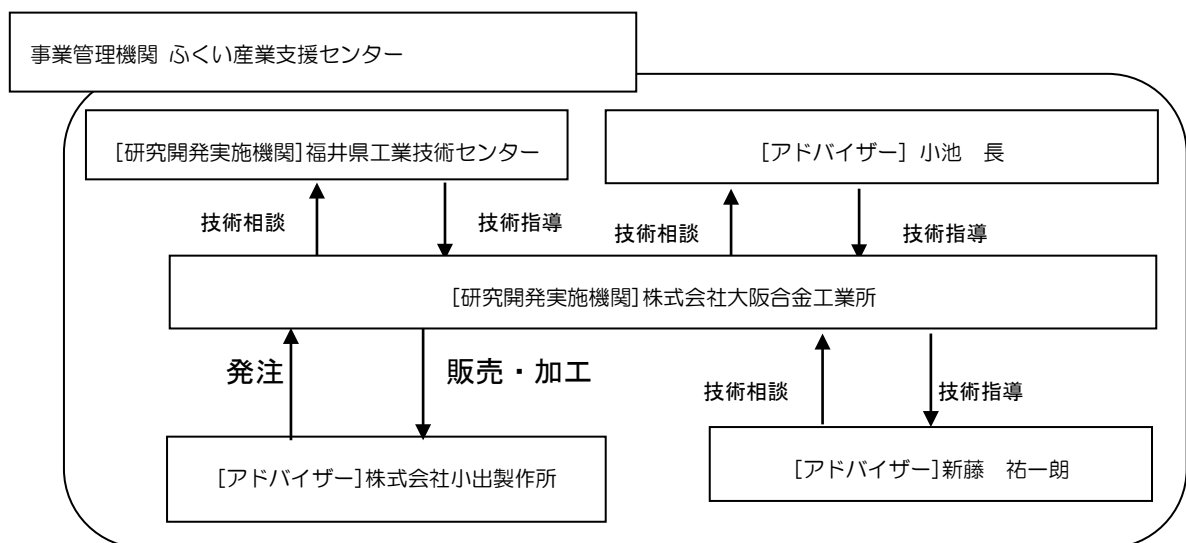
シンバルの音は複雑でスズ濃度が増えるほど高音質なシンバルになるが、硬く、組織も不均質になりやすいため割れてやすくなる。シンバル原板を割れにくくするため結晶粒微細化、原板自体にひずみが無く、音を調整できる双晶組織を形成するための熱処理する技術を開発する必要がある。本研究では、高音質で割れないシンバル原板を開発し海外への輸出を視野に入れたドラム用シンバルへ販路を拡大する。

(2) 研究の目的及び目標

本事業は、Zr 添加でシンバル素材の結晶粒を微細化させることで、割れにくいシンバル素材を作製し、さらに Ti や P を添加してすることで、音を変化させることが可能とする。さらに、プレス式水冷システムを用いて薄い円盤状のシンバル原板に対してひずみなく、割れない高温 β 相組織にするための焼入れ技術を確立し、かつ熱処理温度で β 相に付随する双晶組織の大きさや個数を制御することによりシンバルの音の減衰率を変化させることで、ジャンルに合わせた熱処理技術を確立し、高音質なシンバル用高錫濃度ブロンズ合金を開発するものである。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)



【公開版】

事業管理機関

名称	公益財団法人ふくい産業支援センター
代表者及び役職名	理事長 山内 和芳
本社所在地	〒910-0296 福井県坂井市丸岡町熊堂第3号7番地1-16
主な事業所所在地	〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町61字北稲田10 事業所名：オープンイノベーション推進部
電話番号	0776-55-1555
FAX番号	0776-55-1878
担当者名及び役職名	オープンイノベーション推進部 プロジェクト推進室 室長 吉田 勝紀
担当者のメールアドレス	m.yoshida@fisc.jp
申請者のホームページ	http://www.fisc.jp/
資本金（出資金）	49,780万円
従業員	46人
主たる業種 （日本標準産業分類、中分類）	92 その他の事業サービス業

研究等実施機関

名称	株式会社大阪合金工業所
代表者及び役職名	代表取締役社長 水田 泰成
本社所在地	〒910-3138 福井県福井市白方町第45号5番地9号
主な事業所所在地	〒910-3138 福井県福井市白方町第45号5番地9号
電話番号	0776-85-1811
FAX番号	0776-85-1313
担当者名及び役職名	研究開発部員 小川 渉
担当者のメールアドレス	ogawa@osakagokin.co.jp
申請者のホームページ	http://www.osakagokin.co.jp
資本金（出資金）	6,100万円
従業員	49人
主たる業種 （日本標準産業分類、中分類）	23 非鉄金属製造業

名称	福井県工業技術センター
代表者及び役職名	所長 強力 真一

【公開版】

本社所在地	〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町6-1 字北稲田1-0
主な事業所所在地	〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町6-1 字北稲田1-0
電話番号	0776-55-0664
FAX番号	0776-55-0665
担当者名及び役職名	新産業創出研究部 宇宙・環境研究グループ 主任研究員 寛 瑞恵
担当者のメールアドレス	m-kakehi@fklab.fukui.fukui.jp
申請者のホームページ	http://www.fklab.fukui.fukui.jp/kougi/
資本金（出資金）	
従業員	64人
主たる業種 （日本標準産業分類、中分類）	71 学術・開発研究機関

アドバイザー

機関名又は氏名	株式会社小出製作所
所在地又は住所	〒547-0006 大阪府大阪市平野区加美正覚寺1-22-32
代表者等	①代表者役職・氏名：代表取締役 小出 俊雄 ②連絡先担当者：小出 俊雄 ③06-6791-1824
具体的な協力内容	シンバルの音質評価、顧客との音質評価

機関名又は氏名	新藤 裕一郎（松田産業株式会社に所属）
所在地又は住所	〒358-0034 埼玉県入間市根岸 60（松田産業株式会社）
代表者等	①代表者役職・氏名：代表取締役社長 松田 芳明 ②連絡先担当者：生産統括部 技術開発部 新藤 裕一郎 ③04-2935-0911
具体的な協力内容	組織および機械的性質調査の評価・指針

機関名又は氏名	小池 長（クラフトラボに所属）
所在地又は住所	〒300-0844 茨城県土浦市乙戸1081-60（自宅）
代表者等	①代表者役職・氏名：代表 小池 長 ②連絡先担当者：代表 小池 長 ③029-841-6605
具体的な協力内容	音響評価（吸音、空間の響き等）のアドバイス

1-3 成果概要

【1】金属結晶粒微細化のための最適組織化技術開発

【1-1】Ti、Zr および P の最適な添加量を検討

P に変わり Fe を添加することになったが、Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr（以下 23ZT）および Cu-21Sn-0.1Zr-0.03F（以下 21ZF）の組成が決定し、華やかな音の 23ZT、静かな（ダークな）音の 21ZF と住み分けできた結果、ジャンル別・寸法別での品種も選定することが可能となった。

【1-2】組織観察、機械的性質の調査

組織観察や振動試験の結果、シンバルの音の減衰に寄与しているものが組織の双晶ではなく、冷間加工による加工誘起相転移による ϵ 相が析出した結果、振動を抑制していることを明らかにした。また、素材別でシンバルの減衰の理由も組織から説明がつくことがわかり、シンバルの音の減衰と素材を減衰比で定量化することが可能にした。

【2】プレス式水冷システムを用いたブロンズ熱処理加工技術の高度化

【2-1】有限要素解析（FEM 解析）によるコールドプレートの最適な構造設計

有限要素解析にて原板への温度勾配差が $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以下、冷却速度が $100^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上の目標が達成できた。

【2-2】プレス式冷却システムの開発

【2-3】プレス条件の最適化、および割れ・歪み評価

$\phi 22$ インチ $\times 1.5$ mmの原板で平坦度 1.9%以下の焼き入れ技術を確認することができた。加えて、ハンマーで衝撃を加えて叩いても割れなかったことから、シンバルの焼き入れ技術の開発に成功した。

【2-4】双晶組織形成のための熱処理条件を確立

$\phi 18$ インチ $\times 1.5$ mmの原板に対して、熱処理条件および冷却時間を最適化し、条件を確立した。

【3】ブロンズ組成と音響との相関解析・評価

【3-1】残響・余韻に関連する周波数特性解析

① FFT（高速フーリエ変換）解析等により残響音の減衰状態を調べ、添加材の音質への影響・特徴を把握できた。また、シンバル音の音質評価物理量（ラウドネス：人間が感じる音

【公開版】

の大きさ、シャープネス：金属的な甲高さ・鋭さ）の解析を実施した（3 年目研究のための事前調査）。

これらの結果から、

- ・23ZT では結晶粒度程度にして 300 μ m と華やかさを保つため、Zr 添加量を 0.03%とした。
- ・21ZF ではシンバルの音を保ちつつ減衰が早いダークな音質が求められているため、Zr 添加量を 0.1%とした。

【3-2】組織別シンバルでの放射音音場解析

ブロンズ組成が残響に及ぼす影響を明らかにすることができた。

【3-3】プレス式水冷システムで製作したシンバルの音質評価

ブロンズ組成が音質に及ぼす影響を明らかにすることができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

名称	公益財団法人ふくい産業支援センター
代表者及び役職名	理事長 山内 和芳
本社所在地	〒910-0296 福井県坂井市丸岡町熊堂第3号7番地1-16
主な事業所所在地	〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町61字北稲田10 事業所名：オープンイノベーション推進部
電話番号	0776-55-1555
FAX番号	0776-55-1878
担当者名及び役職名	オープンイノベーション推進部 プロジェクト推進室 室長 吉田 勝紀
担当者のメールアドレス	m.yoshida@fisc.jp
申請者のホームページ	http://www.fisc.jp/
資本金（出資金）	49,780万円
従業員	46人
主たる業種 （日本標準産業分類、中分類）	92 その他の事業サービス業

第2章 本論一（1）

※ 実施内容毎に研究内容及び成果等を記載

【1】金属結晶粒微細化のための最適組織化技術開発

【1-1】第3元素（Ti, Zr, P）の添加量の検討

今回は、10 kg級のインゴットを用いて、Zr 添加量を変えた試験を行い、その結果を受け370 kgでも上下偏析もなく安定して製造ができるか評価した。

①Cu-23Sn-0.3TiX%Zr 組成（以下 23ZT）は、370 kg 級でも上下偏析もなく安定して製造することが可能となった。加えて、Zr 添加量が 0.03%で微細化していることが組織観察の結果からわかっており、ヘラ絞り加工性の有無や、シンバルの音響解析の結果から Zr 添加量を 0.03%に決定した。これらの組織観察や音響解析結果については、小項目【1-2】と大項目【3】で述べる。

②Zr+P 添加は Zr の歩留まりが不安定であったため、安定した製造が難しいとのことだった。しかし、Zr+Fe でも減衰の速いシンバルができることがわかり、かつ 370 kg級の溶製でも上下の偏析が無く試作ができた。表 1 にシンバル素材の分析結果を示す。今後は、P に変わり Fe を添加した、Cu-21Sn0-X%Zr-0.03Fe（以下 21ZF）に変更し、上記同様に音響解析の結果、シンバルの形状を大きくしても減衰が長くなり過ぎない最適添加量を模索した結果、Zr : X=0.1%に決定した。上記同様、組織観察や音響解析結果については、小項目【1-2】と大項目【3】で述べる。これらの分析値を表 1 にまとめた。

表 1. 370 kg級でのシンバル素材の分析結果

No.	溶製日	配合組成	位置	分析値 (wt%)				
				Cu	Sn	Ti	Zr	Fe
サ-50	4/8	Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr	トップ	Bal	22.7	0.3	0.03	-
			ボトム	Bal	22.8	0.3	0.03	-
サ-51	8/17	Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe	トップ	Bal	21.2		0.1	0.035
			ボトム	Bal	21.0		0.1	0.036
サ-52	10/18	Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe	トップ	Bal	21.1		0.1	0.035
			ボトム	Bal	21.0		0.1	0.035

これらの結果、当初の課題であった、①品質の安定および②叩く力が集中して割れるという従来品の改良として、①安定して 370 kg級が製造できること、②Zr 添加で結晶粒微細化を実

【公開版】

現することができた。加えて、華やかな音の 23ZT、静かな（ダークな）音の 21ZF と住み分けできた結果、ジャンル別・寸法別での品種も選定することが可能となった。表 2 にジャンル・寸法別シンバル素材一覧表を示す。

表 2 ジャンル・寸法別シンバル素材一覧表

用 途	合わせシンバル			ドラムシンバル	
ジャンル	ブラスバンド	オーケストラ	子供用	ロック・ポピュラー	ジャズ
求められる音質	音量	深み	鳴らしやすさ	キレ 割れない	静か
>16in	23ZT	21ZF	-	21ZF 減衰が速い	21ZF 減衰が速い
=16in	-	-	-	21ZF or 23ZT	21ZF or 23ZT
<16in	-	-	23ZT	23ZT サイズが小さくても音が鳴る	23ZT サイズが小さくても音が鳴る

23ZT は華やかであるものの減衰時間が長く、その結果、寸法を φ18 インチ以上になると鳴りすぎてしまい、ドラム演奏ではボーカルの声と被ってしまう。そのため、φ18 インチ以上では 21ZF が主に使用される。

この結果、減衰の長さの異なるシンバル素材を開発することで、ジャンルや寸法に合わせたシンバル素材を作ることが可能となった。

【1-2】組織観察、機械的性質の調査

まず、21ZF および 23ZT に関して、Zr 添加量を 0%～0.1%と振って結晶粒の微細化や双晶があるかを確認した。図 1 にその結果を示す。

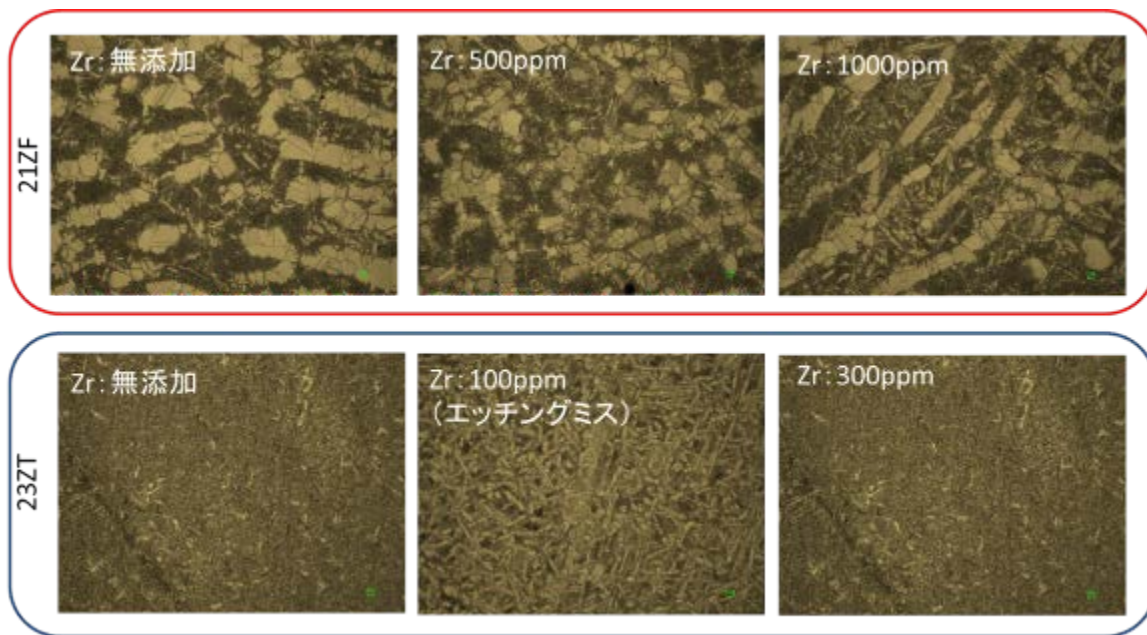


図 1. Zr 添加量を変えた 21ZF および 23ZT の組織写真

Zr の添加量が増えるほど微細化している。組織としては、23ZT では、ほぼ β 相で微細なナノ m サイズの α 相も存在するが双晶は見られなかった。21ZF の組織は、 α 相と β 相の混相で、 α 相内には焼鈍双晶が見られる。

この結果を受けシンバルにした際の音の減衰の長さを解析した。その音響解析結果を図 2 に示す。

この図の減衰曲線の傾きが大きいと減衰が速く、小さいとゆっくり減衰することを示している。明らかに 23ZT より 21ZF の方が、減衰が速いことがわかる。この結果から、シンバルの減衰の長さはこの双晶の影響により減衰が速くなったと考えていた。

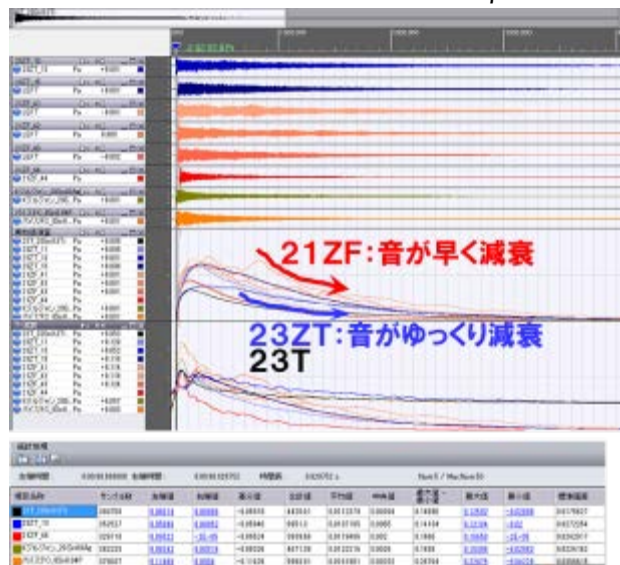


図 2. 21ZF および 23ZT シンバルの減衰曲線

しかし、図 3 に示すように、Zr 添加量と素材との減衰率の関係を調査するため、 $X=0.01 \sim 0.1\%$ と Zr 添加量を変化させて板材 (W20 mm×L250 mm×3 mm) での振動試験を行うと、Sn 濃度での差は出てくるものの Zr 添加量で減衰が大きく変わることはなくシンバルの音響解析結果と異なる結果となった。すなわち、双晶が存在するが双晶はシンバルの減衰に寄与しないことが明らかになった。

改めて試験片の作成工程とシンバル加工工程を考えると、試験片は720℃、つまり2次再結晶温度での熱間圧延で作成したが、シンバルの加工工程は①720℃熱間圧延で原板作成→②720℃熱間プレスで真ん中のカップを成型→③ヘラ絞り加工（冷間加工）でシンバル成型（以下省略）となっている。その結果、冷間加工で

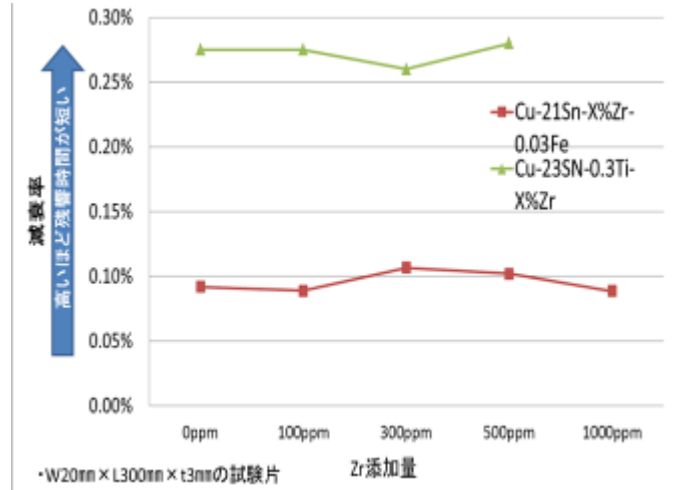


図 3. Zr 添加量と減衰率との相関

あるヘラ絞り加工が減衰に影響を与えていると推察された。また、図 4 に示す EPMA による組織観察をした結果、21ZF 組成では Zr 系金属間化合物がサブミクロン級の大きさで分散していることが分かった。

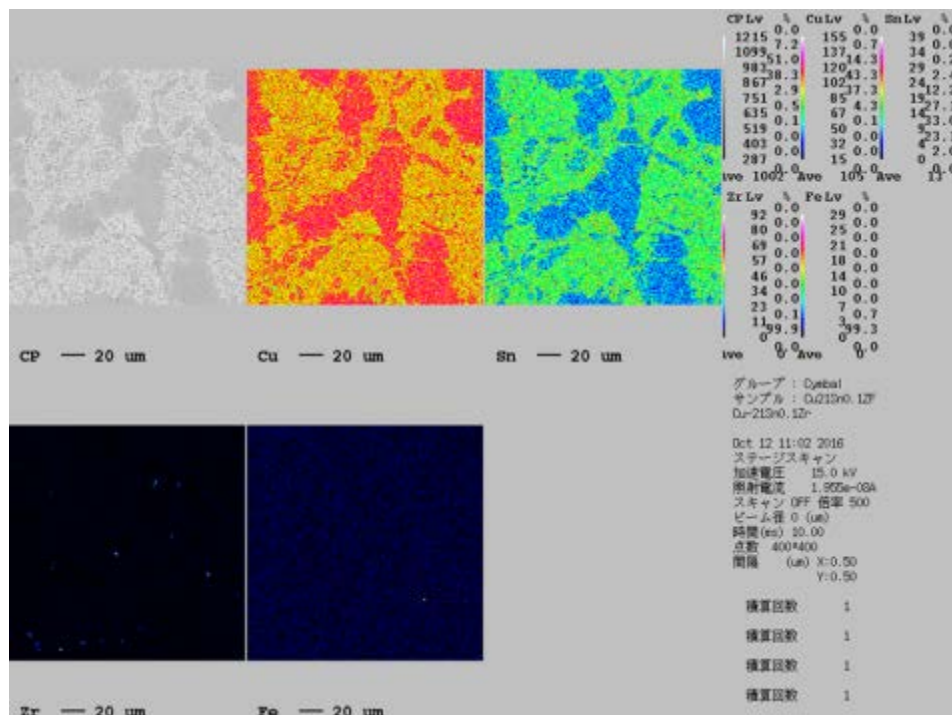


図 4. EPMA による 21ZF のカラーマップ（サブミクロン級の ZrSnFe（？）金属間化合物が晶出）

これらの見解から、熱間加工後では振動試験で差は認められないが、冷間加工後では Zr

系金属間化合物により転位密度が上昇する‘転位型’という減衰機構が原因と推察される。それを明らかにすべく、転位密度が大きくなると硬度が向上するため、ヘラ絞り加工前後での硬度を測定した。図 5 に加工前後の硬度と Zr 添加量の結果を示す。

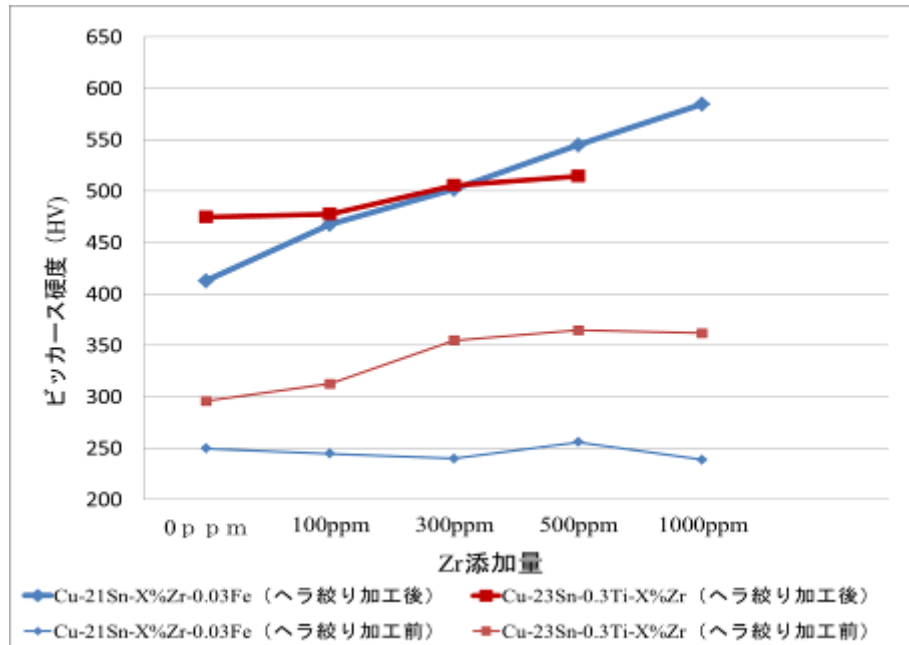


図 5. ヘラ絞り加工前後での硬度測定結果

Cu-21Sn-X%Zr-0.03Fe に関しては、Zr 添加量で硬度が向上していることがわかる。この結果から、冷間加工による微細 Zr 金属間化合物周辺の転位密度が高くなったと考えられる。

従って、シンバルの減衰に影響を及ぼすものは双晶ではなく、Zr 系金属間化合物周辺の転位密度であると推察され、この結果、シンバルの音の減衰が速くなったと考えられる。

そこで、ダークな音の Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe（以下 21ZF）、華やかな音の Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr（以下 23ZT）に関して、素材の違いがシンバルの音、特に減衰特性に与える影響を調査してきた。特に 21ZF ではヘラ絞り加工により硬度に差が出たため、Zr 炭化物周辺の転位密度が大きくなったためと推察される。そのため、21ZF の加工工程ごとの転位密度を測定するため、SPring-8 で測定を行った。図 6 にその様子を、図 7 にその結果を示す。工程ごと（①焼き入れ材（加工前の素材）、②熱間プレス成形ままのカップ部、③ヘラ絞り加工したカップ部とその他の部分（BOW）について Zr 添加材のシンバルから切り出した試験材の X 線回折を行い、回折ピークプロファイル解析による転位密度評価により各工程の転位密度変化の検証を試みた。その結果は予想に反し、得られた回折プロファイルには、転位密度の差

はほとんどなく、加工工程を経るにつれて主安定結晶相の α 相および β 相からの回折ピークに加え、準安定相の ζ 相、 γ 相および ε 相起因と思われる回折ピークが出現しているという結果が得られた。

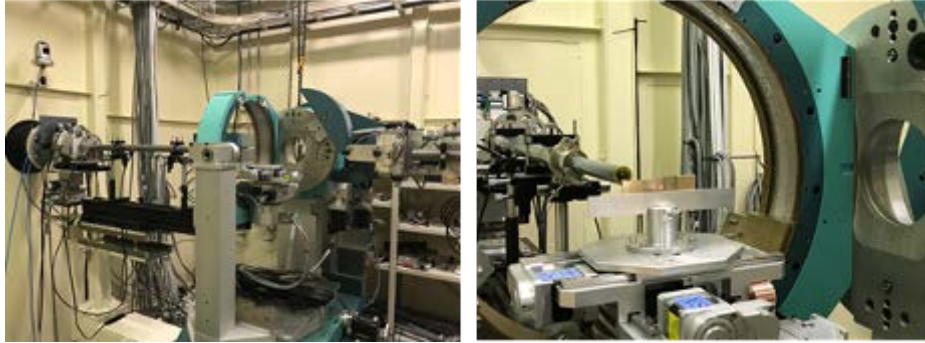


図 6. SPring-8 での転位密度の測定の様子

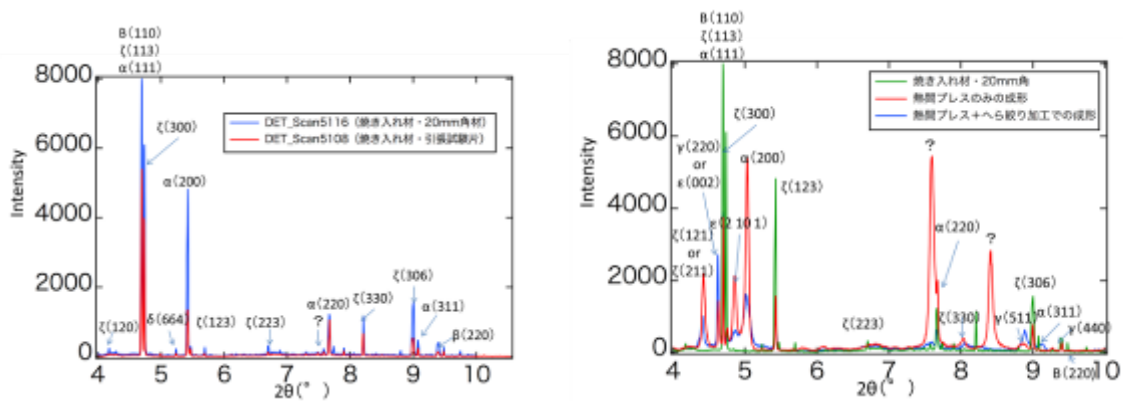


図 7. 加工工程ごとの 21ZF シンバルの転位密度測定の結果

これは、加工が主安定相から準安定相への相変態を誘起していることを示唆しており、当初の推論の見直しが必要である。そのため、もう一度文献検索、状態図および組織観察を行った。図 8 には状態図を示す。まず、状態図では、 α 、 β 相の他に準安定相の ζ 相、 γ 相および ε 相が近接している。水焼き入れの際、固くて脆い δ 相が β 相に相転移する前に準安定相となって凍結したものと推察される。また、図 9 には組織写真を示した。 β 相の中で針状の組織になっていることから、マルテンサイト相の β' 相であると推察される。これらの結果から相の同定を精密に行うには、測定方法を 1 次元検出器ではなく、2 次元検出器で測定する必要がある。

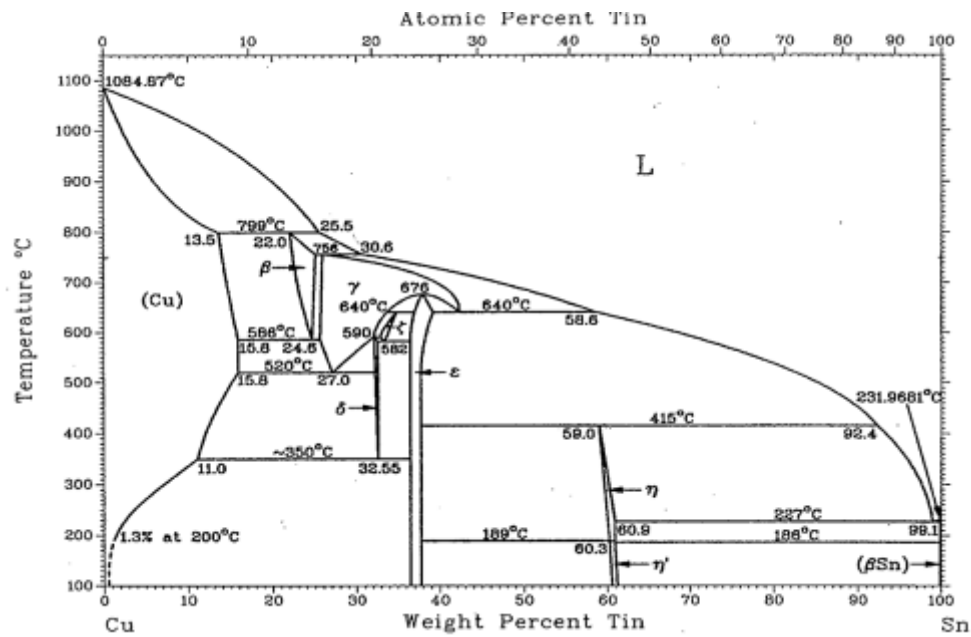


図 8. Cu-Sn 合金の状態図

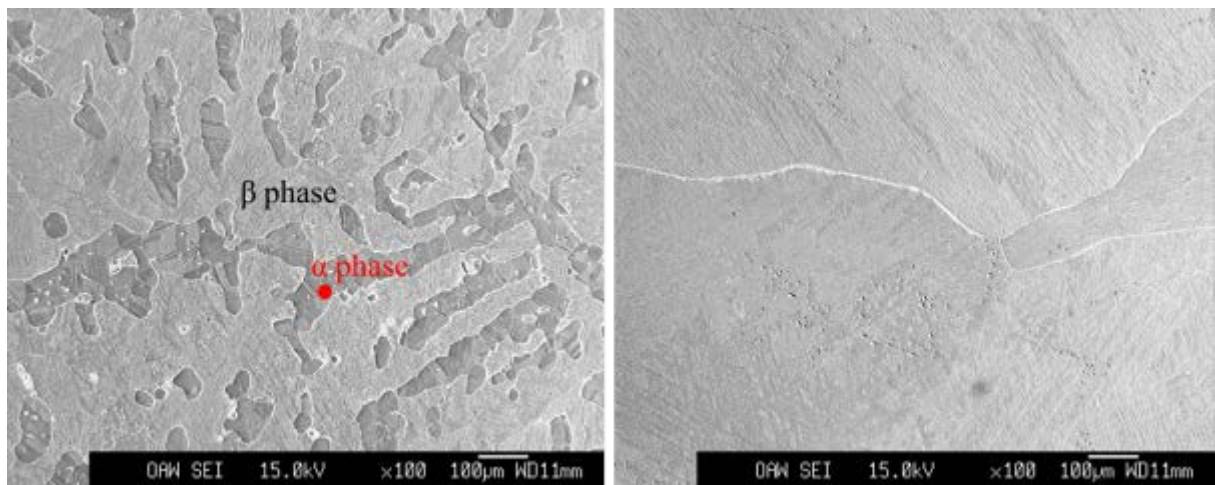


図 9. 21ZF および 23ZT のシンバルの組織観察の結果

したがって、2次元検出器であるイメージングプレート（以下 IP）を用いて、加工工程ごとに測定される回折リングから結晶構造を解析した。試験片としては Ti や Zr を添加していない Cu-21 Sn-0.03 Fe（以下 21F）を標準試料とし、23 ZT シンバルの試験片についても測定し、21 ZF シンバルのような加工誘起相転移と想定される現象が起きているかどうかを比較検証した。

(1) IP による X 線回折リングの測定結果

図 10 に 21F、21ZF 素材で作成したカップ部の熱間圧延後、熱間プレス後、ヘラ絞り加工後における回折リングを示す。いずれも複数の回折リングが得られているが、明瞭な線になっている部分が α 相、点線になっているのは β および γ 相、それに加えて β' 相が得られた。

[5] 次に加工工程毎で回折リングの変化を解析した結果、21F では加工を経ることで回折リングがぼやけ、加えてヘラ絞り加工後はストリーク状の回折が見られる。これは加工により塑性変形されて結晶子が細かくなっているためと推察される。また、ストリーク状の回折は β' および γ 相で見られた。23ZT では、 α 相はなく、 β' および γ 相であり上記同様にストリーク状の回折が見られた。

21ZF では熱間加工上がりの材料に関して 21F と同様の回折リングが得られるが、熱間プレス後でストリークが大きくなり、ヘラ絞り加工後では全体的に回折リングがぼやけ、新しい相の回折リングが確認できる。この新しく析出した相を同定するため、回折リングから得られる 1 次元変換した X 線回折パターンから、相同定を行った。

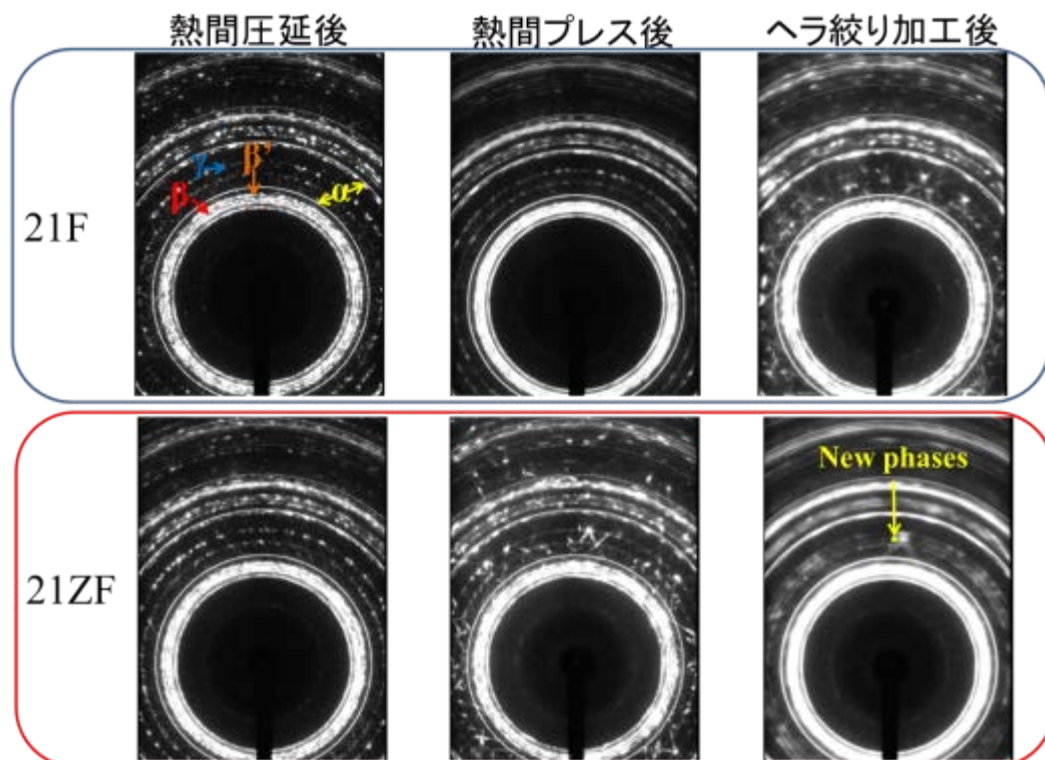


図 10. 21F および 21ZF の X 線の回折リングの結果

(2) 21ZF の X 線回折パターンの結果

図 11 および図 12 に 21ZF の素材で作成した熱間プレス後およびヘラ絞り加工後の X 線回折パターンを示す。冷間加工であるヘラ絞り加工を施すことで、 2.94° および 6.24° で熱間プレス後ではなかったピークが確認できる。相同定した結果、 ϵ 相だと判定した。この相はビッカース硬度で 550HV と非常に硬いことから、カップ部の硬度を硬くしたと推察される。これに対して、カップ部以外の場所を測定した結果では、カップ部と比較すると若干ではあるが ϵ 相の強度ピークが小さい。この結果、場所により硬度に差が出たと推察される。

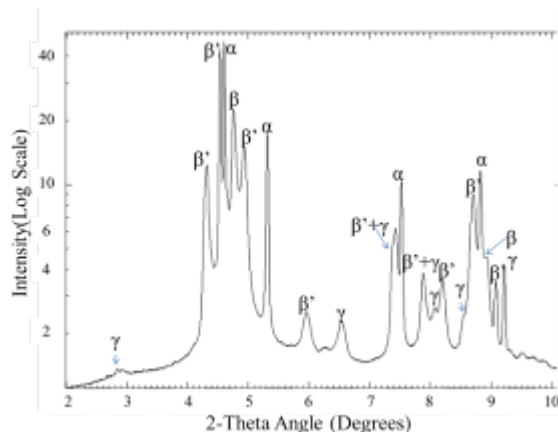


図 11. 熱間プレス後の回折パターン

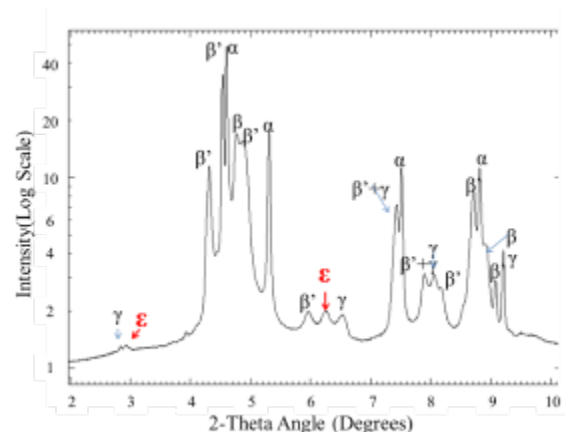


図 12. ヘラ絞り加工後の回折パターン

(3) 考察

表 3 に 4000Hz 付近の減衰比、加工ごとの組織の変化、およびヘラ絞り加工後の硬度についてまとめた結果を示す。この表では解析した組織観察結果とシンバルの音響解析結果をまとめている。21F および 23ZT の組織に関しては、加工工程を経ることで、ストリークが強くなり、かつ全体がぼやけるように見える。これは加工により塑性加工を受けたためと推察される。硬度に関しては、一般的に Sn 濃度が高くなるほど β 相の割合が多くなり、その結果、硬度が高くなる。また、21ZF に関してはヘラ絞り加工を施すことで、21F より硬度が高くなった。この理由は加工誘起相転移により微細で加工度が高い ϵ 相が析出したためと推察される。減衰比に関しては、1/3 オクターブのタイムトレンド解析結果から 4000Hz 付近のピークをもとに読み取り、下記式にて算出した。

$$\zeta = D / (8.68 \times 2\pi f) \quad \dots (1)$$

【公開版】

ここで、D は音の減衰度で 1 秒当たりの減衰量（dB 値）で、2.5 秒後および 5 秒後の音圧の値がどのくらい小さくなっているかをグラフから読み取り算出した。 ζ は減衰比で減衰振動の減衰特性を表す量（%）である。この ζ の値が小さいほど減衰は遅いこと、すなわち音が長くなることを示している。

21F と 23ZT を比較すると、21F の方が減衰比の値が 2 倍大きいため、減衰も早い。この理由としては、分散された α 相（約 110HV）が β 相（約 300HV）と比較して柔らかいため、振動を吸収し減衰が早くなったためと推察される。したがって、基本的な音の長さは α 相の量に反比例すると考えられる。また、ストリークが見られる γ 相や β' 相の割合が増えると音の減衰が長くなると推察され、その結果、23ZT の減衰比が低くなったと思われる。しかし、21F と 23ZT の回折リングの結果からは、結晶構造が大きく変化することはなかった。

21ZF で音の減衰が早くなった理由は、ヘラ絞り加工で与えられる加工によって加工誘起相転移が起こった結果、Zr 炭化物周りに硬い ε 相が析出し、この硬い相が振動を抑制しているためと推察される。その結果、シンバルの音の減衰比に大きな影響を与えていると考えられる。また、CUP とその他の部分で硬度の差がある。これは 6.24° の強度のピーク値がカップ部では 2.02、その他の部分（BOW 部）では 1.72 と差があったため、カップ部の方が ε 相の析出が多く、その結果、硬度の差が表れたと推察される。

表 3. 組成別のシンバルの減衰と組織のまとめ

試料の組成(wt%)	へら絞り加工後の硬度	加工ごとの組織の変化	4000Hz付近の減衰比 ζ
Cu-21Sn-0.03Fe	CUP:240~250HV BOW:240~250HV	α 相が分散し、 β' 相と γ 相のストリークが強くなる	0.00401
Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe	CUP: 270~300HV BOW:250~270HV	へら絞り加工で ε 相が析出	0.00923
Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr	CUP:300~320HV BOW:300~320HV	β' 相と γ 相のストリークが強くなる	0.00317

【2】プレス式水冷システムを用いたブロンズ熱処理加工技術の高度化

【2-1】有限要素解析（FEM 解析）によるコールドプレートの最適な構造設計

FEM 解析でコールドプレートの構造設計を熱の分布などを解析するためには、密度、熱伝導および比熱のデータが必要となる。シンバル素材の常温でのデータでは、密度：8.56kg/m³、熱伝導度：25.97W/m・K、比熱：0.38kJ/(kg・K)という値があるため、それを700℃加熱したものとしたデータに近似して有限要素モデルを作成・解析中であるが、実際に700℃での密度、熱伝導および比熱のデータの測定も検討している。

図13に、圧延後に、720℃まで加熱し熱処理をした組織を示す。

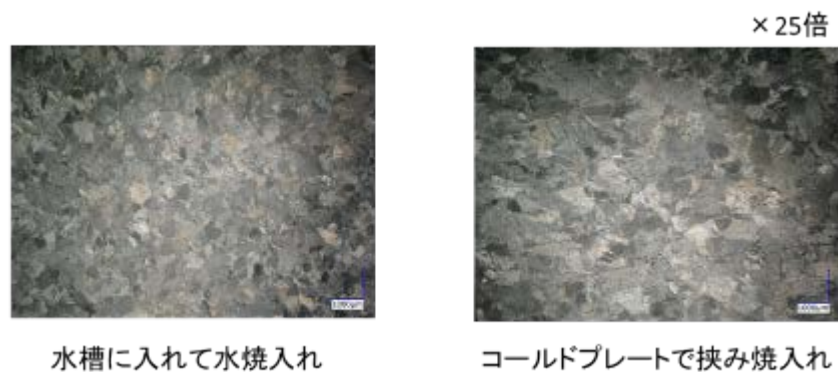


図13. 焼入れ方法の違いによる金属組織の比較

左側は水槽に入れて焼入れした組織で、右側がものづくり補助金で購入した簡易なコールドプレートでの焼き入れした組織の写真である。なお、組成は Cu-23Sn-0.3Ti で Zr は添加していない素材で、冷却する水の温度はどちらも 20℃で作業を行っている。写真に示すとおり組織の大きさはそれほど変わりなく、割れの原因となる組織である δ 相は確認できなかったが、コールドプレートで冷却した素材の方が切断する際に少し脆さを感じた。これは冷却速度に問題がある。水焼入れする方は、入れた瞬間に 720℃から 20℃まで一気に試料の温度は下がるが、コールドプレートの方は 30 分間ぐらい挟まないと 20℃まで下らない。これは δ 相が細かく分散してでているものと推察されるため、この試料を電子顕微鏡で観察し解析する必要がある。いずれにせよ、コールドプレートで冷却する際、水槽に入れる焼入れと同等の冷却速度にするためには、チラーを用いて冷却水の温度を下げる必要がある。冷却する水の温度をどのくらい下げるかも視野にいれ、コールドプレートの最適な構造設計を行い、【2-2】のプレス式冷却システムの開発につなげる。

【2-2】プレス式冷却システムの開発

シンバル原板に焼き入れを行う設備を開発した。図 14 にその設備の全体構造図を示す。今回は、コールドプレートが上下で動くようになっており、ほぼ同時に試料を挟み込んで、冷却する際の温度分布の差を減らすことを取り入れている。本研究ではプレス条件の最適化、および割れ・歪み評価を行った。その結果を【2-3】で示した。

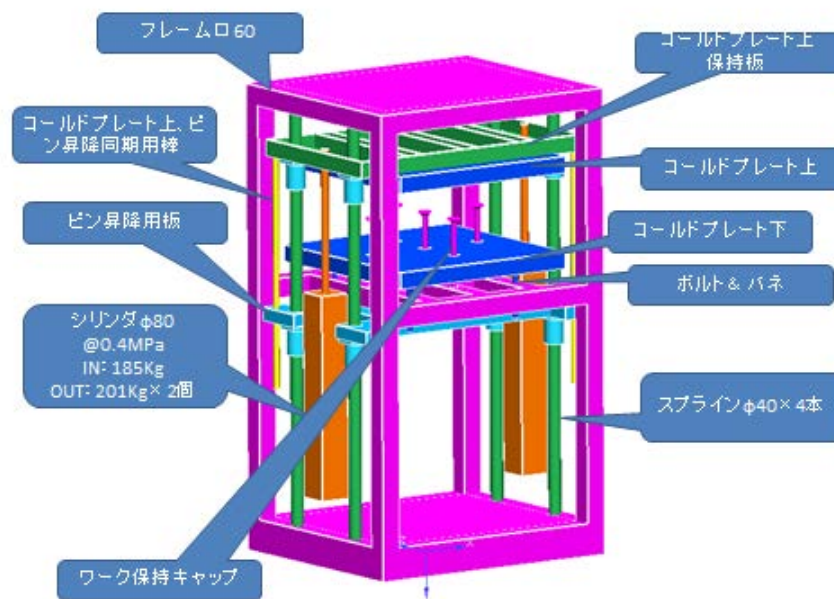


図 14. にコールドプレート設備の全体構造図

【2-3】プレス条件の最適化、および割れ・歪み評価

シンバル原板を作製するプレス式冷却システムの構築した。

1 年目は加熱炉、搬送ロボットを導入し、今年度はコールドプレート導入から、設備の完成し、試運転までを行った。その結果、φ22 インチ×1.5 mmの原板で平坦度 1.9%以下の焼き入れ技術を確立することができた。加えて、ハンマーで衝撃を加えて叩いても割れなかった。現在、1%以下になる条件を調査中である。図 15 に導入した設備の全体図および写真 16 に実際に屋巾下 φ18 インチ×1.5 mm試験材の評価を示す。また、熱による変形を考慮するため、温度条件および熱処理時間の最適化試験を行った。その結果、φ18 インチ×1.5 mmの原板で、730°C×1 分保持することで平坦度 1.5%まで下げることができた。また、冷却温度は 1 分 30 秒で常温になる。したがって最適条件を確立できた。



図 15. プレス式冷却装置全体



図 16. 試験材の評価

【2-4】双晶組織形成のための熱処理条件を確立

本試験では、【1】で書いている通り、今回の振動の減衰が早くなる理由は双晶ではなく、ヘラ絞り加工による加工誘起相転移による ε 相の析出によるものだったので、双晶組織形成のための熱処理条件を確立するには至らなかった。

【3】ブロンズ組成と音響との相関解析・評価

【3-1】残響・余韻に関連する周波数特性解析

まずどの周波数帯の音圧が大きいかを見るために全オクターブ分析を行った。図 17 にその結果を示す。

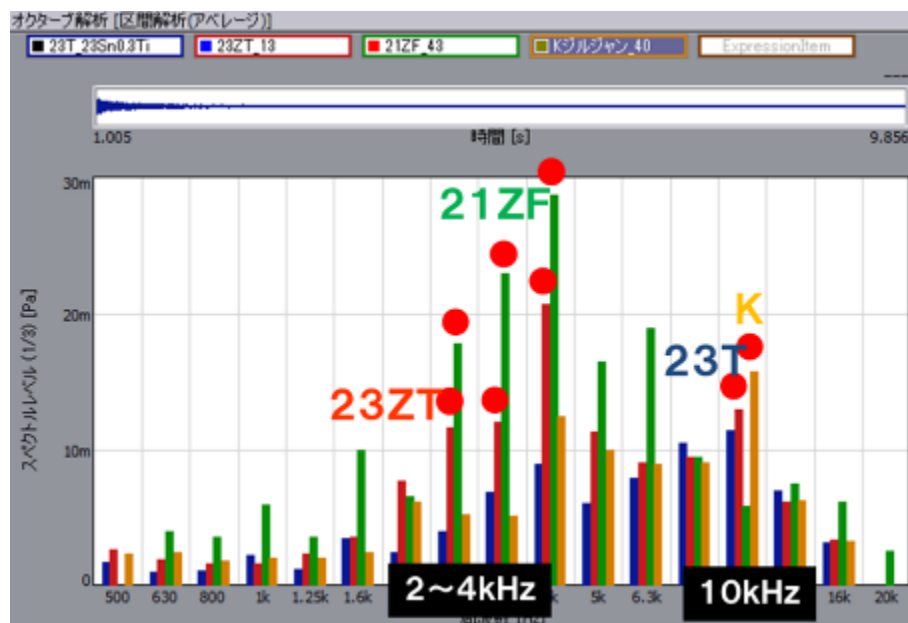


図 17. 各シンバルの全オクターブ分析結果

【公開版】

対象は、従来品の 23T およびジルジャン、開発品の 23ZT および 21ZF である。従来品（23T、他社）では 10000Hz 付近に音圧のピークが大きくなるのに対して、開発品（21Z、23ZT）では 2000～4000Hz 辺のピークが大きくなることから、さらにどの周波数帯域に音成分をもつか、どの周波数成分が響いているかを解析するため、全時間フーリエ変換解析（FFT）を行った。図 18 にその結果を示す。

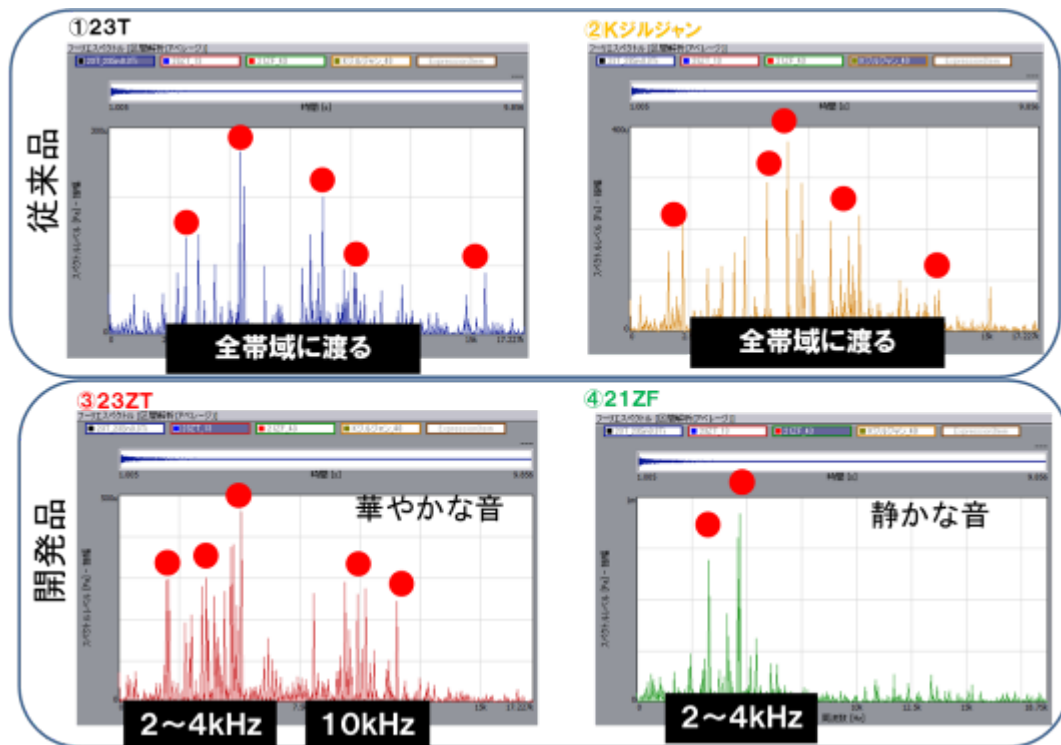


図 18. 各シンバルの全時間フーリエ変換解析結果

従来品の 23T と K ジルジャンはスペクトルが似ている傾向にあり、全帯域に渡ってスペクトル成分が立つことがわかる。それに対して、開発品の 23ZT では、高周波成分を保ったまま、低周波成分（2000～4000Hz）が際立つこと、21ZF では、高周波成分が消失し、2000～4000Hz のみが際立つことがわかる。また、どの周波数帯域の音成分が響いているのか、残響に影響する周波数成分を調べるためパワースペクトログラム解析（横軸：時間、縦軸：周波数）を行った。それを図 19 に示す。

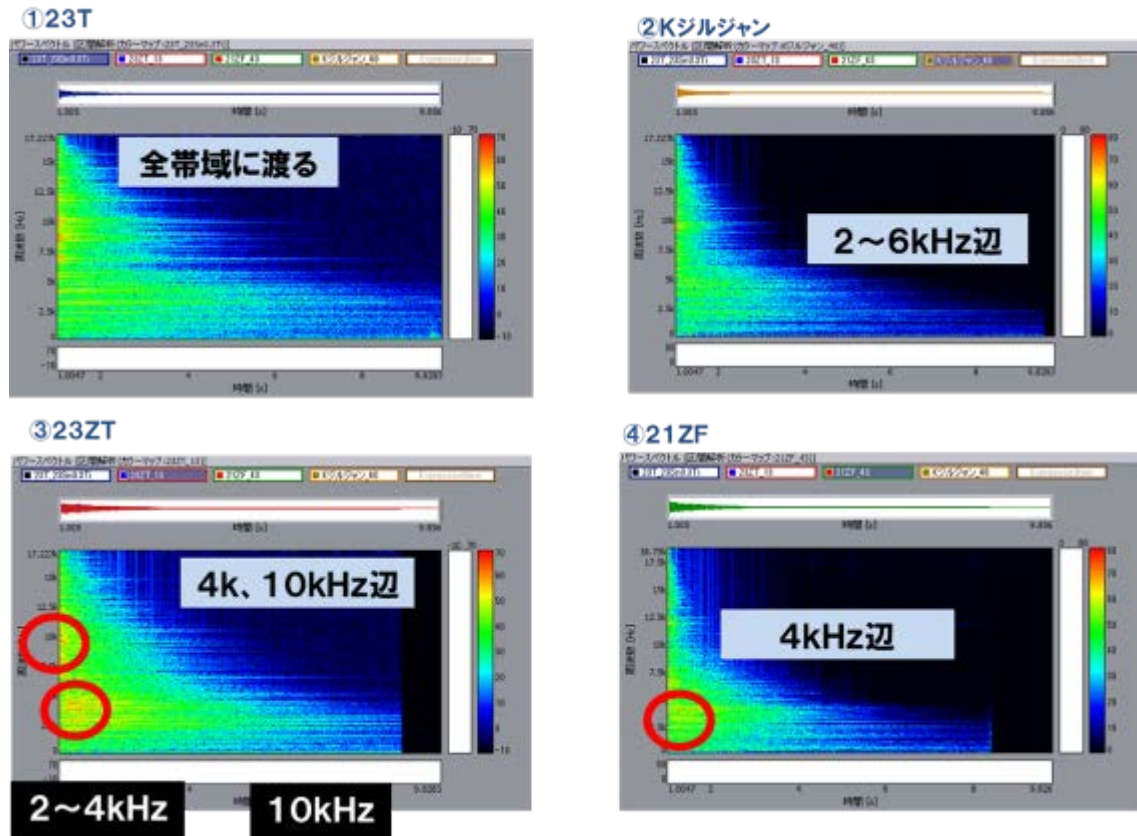


図 19. 各シンバルのワースペクトログラム解析

23T と K シルジャンは残響が似ている傾向にあるが、23T の方が、高周波（10000Hz）成分が強く出ており、全帯域に渡って成分が響くことがわかる。4000Hz 以上の周波数帯域の残響時間に関しては、23T では 5 秒以上と長く、K シルジャンでは、約 5 秒程度で、特に 7500Hz より高い周波数では 2.5 秒と減衰が速い。それに対して、23ZT では、高周波成分を保ったまま、低周波成分が際立って響き、減衰時間もほぼ同様の結果を得られた。したがって従来品の華やかな音を保ちつつ、鳴り易く割れにくいシンバルの開発ができた。21ZF に関しては、高周波成分が消失し、低周波成分のみが際立つ。これは、FFT 解析結果と一致している。加えて 7500Hz より高い周波数では 1.5 秒と減衰がかなり速いシンバルとなった。したがって、減衰が速い静かな音のシンバルを開発し、両方で音の違いがあるシンバル素材の開発に成功した。

前述の F F T 周波数解析結果においても、時間一音波形包絡が同様の傾向を示していたので、減衰比 τ の解析によりシンバルの減衰傾向を定量比較することができたので、【3-1】について今年度の目標は達成できた。

【3-2】組織別シンバルでの放射音音場解析

【3-2】組織別シンバルでの放射音音場解析

シンバルの非定常突発音の放射音音場解析を行った。図 20 に解析結果の一例を示す。シンバル打撃による放射音の時間推移を可視化することができた。

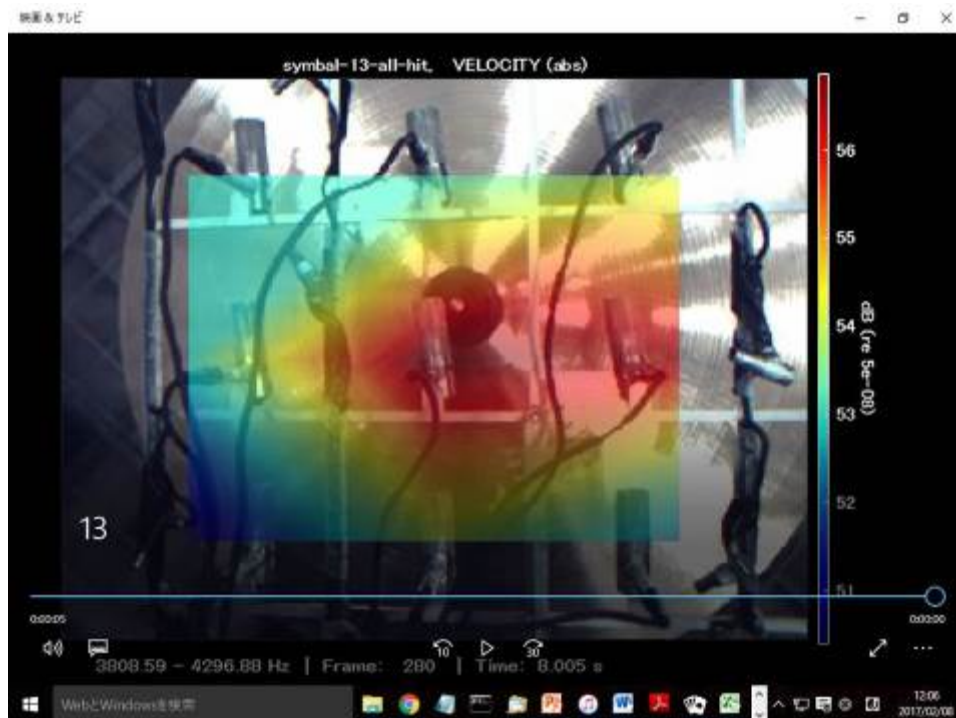


図 20 シンバルの放射音音場解析

前記の 21F と 23ZT では 21F の方が減衰度が大きく、減衰が早いという材別の傾向と特徴について、放射音場解析結果と照らし合わせた評価を実施した。PU プローブによる音響粒子速度の解析結果では、21F と 23ZT を比較すると、特に 8~20kHz までの高周波域でスペクトラムが異なり、21F の振幅レベルが大きいことが分かった。これについて、インパクトハンマを用いて打撃入力を与えた場合での音圧－音響粒子速度間の伝達関数を計測した結果を、図 21 に示す。

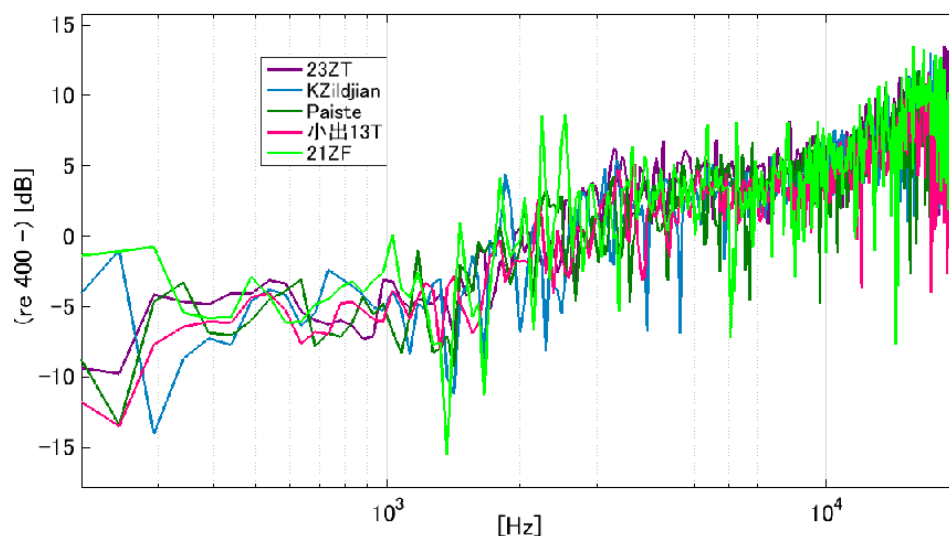


図 21. シンバルの放射音音場解析結果（材別 打撃応答の伝達関数）

比較として、他社であるK ジルジャン製品、パイステ製品についても計測している。21ZF の音響粒子速度応答レベルが全帯域で高く、また、ピーク/ディップの発生も他製品より多発している特徴が分かった。これについて、対象とした 5 製品について、音響粒子速度・音圧のオーバオール値より減衰率を算出した結果を表 4 に示す。

表 4. 開発シンバルの打撃後音響粒子速度と音圧の減衰比率（他社製品比較）

No.	材名	最大応答時刻(sec)	減衰比率(%)	
			音響粒子速度	音圧
1	21ZF	0.311	16.10	22.32
2	23ZT	1.516	8.11	20.19
3	Kジルジャン	0.778	6.90	10.19
4	パイステ	1.925	3.60	17.31

21ZF は音響粒子速度/音圧ともに減衰比率が大きく、振動の減衰が大きいことを示す。この結果より、放射音場計測解析では、前述のブロンズ相転移が起こった影響についての現象考察と一致する結果が得られた。

【3-3】プレス式水冷システムで製作したシンバルの音質評価

今年度導入した音質評価解析装置を用いて、開発品 23ZT、21ZF および他社 K ジルジャン製品(K)、パイステ製品(P)、従来品(23T)を対象とした音質評価解析を実施した。シンバルの

音質を表現できる物理的な音質評価尺度（音圧レベル、ラウドネス、シャープネス）をにより、音質を物理量で比較できた(表 5)。

表 5.開発シンバルの音質評価結果（音質評価尺度別の感覚量比較）

No.	1	2	3	4
材名	21ZF	23ZT	Kジルジャン	パイステ
ラウドネス (sone)	7.11	6.63	4.97	5.1
ラウドネスレベル (phon)	68.29	67.29	63.14	63.49
シャープネス (acum)	1.17	1.47	1.41	1.66
音圧レベル (dB)	65.41	61.66	59.38	63.1
A特性音圧レベル (dB)	65.88	62.05	59.08	62.21

いずれの評価尺度についても、打撃後 4 秒間での平均値を比較対象とした。ここで特に、ラウドネスは聴覚特性を加味した音の大きさを表し、シャープネスは金属的な音の鋭さ、甲高さを表す尺度である。開発シンバルに求められている、鳴らし易く減衰が早い音の特徴を表すには、音の立ち上がり部分での人間の聴覚感度を加味した A 特性音圧レベルおよびラウドネスレベルを比較するのが適当であり、また、金属性因子についてはシャープネスで比較するのが適当と考えた。これについて、開発 2 材はラウドネス値が高く、特に 21ZF はシャープネスが小さい音質であることが分かった。

これらの音質評価解析結果の一例として、打撃後 5 秒間での材別ラウドネスの減衰波形（1/3 オクターブバンド タイムトレンド）を、図 22 に示す。

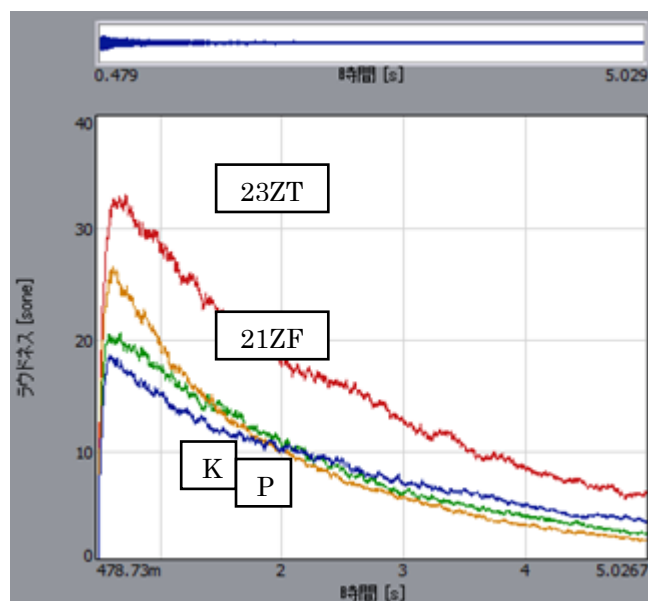


図 22.開発シンバルの音質評価結果（ラウドネス タイムトレンド）

また、前述の減衰比 τ について、21F と 23ZT の比較検証した結果を表 6 に示す。

表 6.開発シンバルの減衰比比較

1/3オクターブ分析 タイムトレンド
中心周波数 4kHz

No.	材名	P1 (2.5s) dB値	P2 (5s) dB値	減衰比 τ (%)
1	21ZF	71.29	24.96	0.00923
2	23ZT	63.99	46.69	0.00317
3	Kジルジャン	59.29	37.41	0.00401
4	パイステ	54.34	36.85	0.00321

21ZF は減衰比が最も高く、残響時間が短い結果を表現できている。材料との相関については、前述の考察の通り。

さらに、放射音場解析結果と合わせて考察すると、開発 2 材は音の立ち上がりでの聴感的な音圧は大きく感じ、特に 21ZF については、高周波成分が残響の主成分であることが音質の違いに影響を与えているということが推測できた。

最終章 全体総括

【1-1】Ti、Zr および P の最適な添加量を検討

P に変わり Fe を添加することになったが、Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr（以下 23ZT）および Cu-21Sn-0.1Zr-0.03F（以下 21ZF）の組成が決定し、華やかな音の 23ZT、静かな（ダークな）音の 21ZF と住み分けできた結果、ジャンル別・寸法別での品種も選定することが可能となった。

【1-2】組織観察、機械的性質の調査

組織観察や振動試験の結果、減衰に寄与しているものが組織の双晶ではなく、冷間加工による加工誘起相転移による ϵ 相が析出した結果、振動を抑制していることを明らかにした。また、素材別でシンバルの減衰の理由も組織から説明がつくことがわかり、シンバルの音の減衰と素材を減衰比で定量化することが可能にした。

【2-1】有限要素解析（FEM 解析）によるコールドプレートの最適な構造設計

有限要素解析にて原板への温度勾配差が $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以下、冷却速度が $100^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上の目標が達成できた。

【2-2】プレス式冷却システムの開発

【2-3】プレス条件の最適化、および割れ・歪み評価

$\phi 22$ インチ $\times 1.5$ mmの原板で平坦度 1.9%以下の焼き入れ技術を確認することができた。加えて、ハンマーで衝撃を加えて叩いても割れなかったことから、シンバルの焼き入れ技術の開発に成功した。

【2-4】双晶組織形成のための熱処理条件を確立

$\phi 18$ インチ $\times 1.5$ mmの原板に対して、熱処理条件および冷却時間を最適化し、条件を確立した。

【3-1】残響・余韻に関連する周波数特性解析

① FFT（高速フーリエ変換）解析等により残響音の減衰状態を調べ、添加材の音質への影響・特徴を把握できた。また、シンバル音の音質評価物理量（ラウドネス：人間が感じる音の大きさ、シャープネス：金属的な甲高さ・鋭さ）の解析を実施した。

これらの結果から、

- ・ 23ZT では結晶粒度の $300\mu\text{m}$ と華やかさを保つため、Zr 添加量を 0.03%とした。
- ・ 21ZF ではシンバルの音を保ちつつ減衰が早いダークな音質が求められているため、Zr 添加量を 0.1%とした。

【3-2】組織別シンバルでの放射音音場解析

ブロンズ組成が残響に及ぼす影響を明らかにすることができた。

【3-3】プレス式水冷システムで製作したシンバルの音質評価

ブロンズ組成が音質に及ぼす影響を明らかにすることができた。

補助事業の成果に係る事業化展開について

(1) 想定している具体的なユーザー、マーケットおよび市場規模などに対する効果

大阪合金工業所の具体的なユーザーとしては、シンバルメーカーである小出製作所を想定している。シンバルの世界市場は 150～200 億円、国内市場は 10 億円であると想定しており、加工性を上げるため、錫の濃度を低くするメーカーが多い中、音質を上げた高錫濃度シンバルの音の特徴を生かして販売していきたい。また、ドラムの演奏は叩くピッチが年々速くなっており減衰が速いシンバルが求められている。今後は、Zr と減衰との関係を明らかにすることで、顧客ニーズに合わせたシンバル素材の提供も可能である。

(2) 事業化見込み（目標となる時期・売上規模）

2019 年に開始し、2020 年には販売を開始したい。2023 年にはシンバル用原板として 1.7 億円の売上を目指す。

製品等の名称		高音質なシンバル用ブロンズ原板				
開発事業者		株式会社大阪合金工業所				
想定するサンプル出荷先		株式会社小出製作所、ジルジャン（アメリカ）、パイス（スイス）				
スケジュール	事業年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度
	サンプルの出荷	→				
	追加研究	→				
	設備投資					
	製品等の生産					→
	製品等の販売					→
	特許出願					→
	出願公開					→
	特許権設定					→
	ライセンス付与					
売上見込	売上高(千円)	57,600	67,200	81,600	120,000	168,000
	販売数量(単位を記載)	7,200 枚	8,400 枚	10,200 枚	15,000 枚	21,000 枚
	売上高の根拠	・原板平均価格:8,000 円/枚 ・シンバルの海外への輸出本格化、小出シンバルのブランド化 ・海外シンバルメーカーへの輸出				